

## A vashelyvétel hatékonyságának vizsgálata

CSEH EDIT, BUJTÁS KLÁRA, BUZÁS ISTVÁN, SZEBENI SZABOLCSNÉ,  
MEISEL TIBORNÉ, MÁDY GYÖRGY és LAKATOS BÉLA

ELTE Növényélettani Tanszék, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete,  
MTA Központi Kémiai Kutató Intézete, Budapest

A mezőgazdasági gyakorlatban egyre fontosabb kérdés a kultúrnövények mikroelem-ellátottsága — a hiánytünetek megszüntetése —, és a toxikus koncentrációk hatása elleni védelem. Mindkét kérdés előtérbe állítja a komplexképzők fontosságát is.

Miután a vashiányos klorózis az egyik legjelentősebb a gazdasági kárt okozó hiánytünetek közül, ezért az utóbbi években fokozott érdeklődés tapasztalható a vas(II)-ion-felvétel mechanizmusának kutatása iránt [8, 21, 24, 25, 28, 29]. A növények vashelyvétele, -hasznosítása jobban nyomon követhető a külső vaskoncentráció és a növény élettani folyamatai közötti összefüggések feltárásával, mint a növény összes vastartalmának meghatározásával. Az előbbi vizsgálati módszer ugyanis a növényben valóban hasznosuló, az anyagcsere-folyamatokban aktív szerepet játszó vas hatását veszi figyelembe [12].

Meggyezik a kutatók véleménye abban, hogy a vasat jól hasznosító növények:

- képesek a külső oldat pH-ját csökkenteni [7, 15, 19, 20, 21];
- redukáló anyagokat adnak le az oldatba [5, 17, 24, 26, 35];
- gyökérükben és a xylémnedvben nagy a citráttartalom, ami a vas(III)-iont komplexben tartja a növényi sejtnedvben előforduló pH-tartományban [4, 6, 9, 34];
- a gyökérükben kicsi a foszfátion-tartalom [3, 16, 28, 30].

Megválaszolatlan kérdés, hogy a nitráttal táplált növények miért reagálnak az elégtelen vasellátásra jelentős  $H^+$ -ion kiválasztással, ami a gyökér környezetében szélsőségesen kis pH-t eredményez [1, 13]. A kiegyensúlyozott tápoldatban vagy talajban növekvő növény nitráttáplálásakor a nitrát ammóniává történő redukciója során  $HCO_3^-$  képződik, ami leadódva a külső közegbe azt lúgosítja [11].

Ugyanilyen nyitott kérdés a vas(III)-vas(II)-vé történő redukcióját okozó anyagnak (anyagoknak) milyensége (redoxpotenciálja) és mennyisége (redoxkapacitása), vagyis a gyökérnek az ún. „reduktív kapacitása”, valamint az, hogy a redukáló anyag (anyagok) esetleg a vas(II) specifikus szállítójaként szerepel(nek)-e. Japán kutatók árpagyökerek tápoldatából izolálták a vas természetes kelátorát, a mugineinsavat [32, 33], majd a mugineinsav Cu-komplexének a röntgenszerkezetét is felderítették [22]. Az anyag prekursorait a legkülönbözőbb növények leveleiben is megtalálták [32, 33]. Újabban vashiányos tápoldatban nevelt zabból izolálták az avenasavat [14], búzából pedig

a 2'-deoximugineinsavat, mint természetes vas-kelátorokat [23]. OLSEN és munkatársai [26] vizsgálatai szerint paradicsom gyökerének exudátumában kávéssav, illetve ennek származékai a redukáló anyagok. MARSCHNER és munkatársai [21] megállapították, hogy vashiányban a gyökér redukatív kapacitása megnő, a redukáló anyag a gyökérből csak akkor adódik le, ha a pH értéke 4 alá csökken.

Az utóbbi években a primer sejtfal összetételének és szintézisének alaposabb megismerése a vasfelvétel és -hasznosítás vizsgálataiban is új gondolati iránynak ad teret. A sejtfal anyagcseréjében a glikoproteinek fontos struktúrális komponensként játszanak szerepet. Fő aminosav-alkotórészük a hidroxiprolin (alanin, szerin). A vas(II) hiánya megakadályozza a prolin hidroxilációját és a glikozidációját is [27, 31]. A glikoprotein-szintézis vas(II)-igénye esetleg megmagyarázhatja a komplexképzők növekedésserkentő hatását.

Vizsgálatainkban a következő kérdéseket tanulmányoztuk: Milyen vas-koncentráció optimális a növény fejlődésére? Milyen élettani folyamatok változásával jellemezhető a vashiány? Egyéb mikroelemhiányok adnak-e hasonló tüneteket vízkultúrában rövid ideig nevelt növényeknél? Az igen nagy mértékben vashiányos növény képes-e regenerálódni? A levelekre juttatott vas-vegyületek milyen mértékű regenerálódást eredményeznek a hajtás és a gyökér növekedésében? Kimutatható-e a komplexképző feleslegének kedvező hatása? A természetes komplexképzők (pl. fulvosavak) kísérleti, laboratóriumi úton előállított mesterséges származékainak hatása milyen mértékű a  $\text{Fe}^{III}\text{EDTA}$  hatásához viszonyítva?

### Vizsgálati anyag és módszer

Vizsgálatainkhoz vízkultúrában nevelt, különböző korú uborkanövényeket (*Budai korai* fajta) használtunk.

A magvakat 3,0%-os hidrogén-peroxidos sterilizálás után, két réteg, desztillált vízzel megnedvesített szűrőpapíron, Petri-csészében, sötét termosztátban, 24–48 órán át 24 °C-on csíráztattuk. Ez alatt a gyökér fejlődésnek indul és az egyformán csírázó növények kiválogathatók. A növényeket a Petri-csészéből  $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  koncentrációjú  $\text{CaSO}_4$ -oldatra ültettük át, és sötét termosztátban tartottuk mindaddig, míg a hipokotil elérte a kb. 20 mm-t. Ezután a kalciumszulfát-oldatot tápoldatra cseréltük, és a növényeket fényre helyeztük. A megvilágítás Floralux fénycsővel történt 14 óra fény – 10 óra sötét periódussal. A különböző célú kísérletekben a növények neveléséhez egységesen, négyszeresére hígított Hoagland-oldatot használtunk, amelynek összetétele a következő volt:

$\text{KNO}_3$	$1,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$	$1,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$	$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$0,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$

mikroelemek:	$\text{H}_3\text{BO}_3$	$1,15 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$	$4,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$	$1,9 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	$1,24 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$	$8,0 \cdot 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$

A vasat a növények vas(III)-komplexek formájában kapták. A vas(III)-ion komplexbe vitelére citrátot, etilén-diamin-tetraacetátot (EDTA) és mesterséges fulvosav-származékokat (FuN) alkalmaztunk. A vas(III)-EDTA komplex előállítását a. lt. tisztaságú  $\text{Fe}^{\text{III}}$  EDTA egyszer desztillált vízben történő oldásával történt. A vas(III)ion koncentrációját a tápoldatban az egyes kísérleteknél adjuk meg.

A mesterséges fulvosav-származékok előállítását az MTA KKKI-ben kidolgozott szabadalom alapján végeztük el [18]. Ez a FuN vas(III)ionokkal, valamint a többi esszenciális *3d* és *4d* átmeneti fémionokkal vízdékony kelát típusú komplexeket ad. A kelátor bruttó savi kapacitása 5 mgé/g a kiindulási száraz anyagra, illetve a kelátor mennyiségére vonatkoztatva. A vas(III)-ionokat vizes oldatban tartó képessége (pH = 5–12) a savi kapacitás négy-szerese. Ilyen nagy mennyiségű vas(III)ion oldatban csak polinukleáris, koloid formában lehetséges. Valódi komplexek csak a savi kapacitásnak megfelelő arányban (FuN + 1,0  $\text{Fe}^{\text{III}}$ ), vagy ennél kisebb arányban, pl. egytized részénél (FuN + 0,1  $\text{Fe}^{\text{III}}$ ) képződnek. A tápoldatot hetenként kétszer cseréltük.

Rövidebb idejű, néhány hetes nevelést igénylő kísérletekben egy-egy variáns neveléséhez 800 cm<sup>3</sup>-es főzőpoharakat használtunk, melyben a növényeket rozsdamentes acélhálóra ültettük. A hosszú idejű, 1 hónapig tartó, vagy azt meghaladó növénynevelésnél, valamint annak érdekében, hogy igen erősen vashiányos növényeket tudjunk előállítani, polietilén edényeket használtunk. A növényeket az edényt lezáró polietilén fedő furataiba helyeztük, polietilén gyűrű középebe, amely megakadályozza a növények eldőlését. Egy-egy 2 dm<sup>3</sup> ürtartalmú edénybe 7 csíranövényt ültettünk.

Meghatároztuk az oldatok eredeti pH-értékét és az oldatok cseréjekor mértük a hidrogénion-koncentráció változását Radelkis OP-208 pH-mérővel.

A növény növekedését a gyökér, az egyes levélemeletek levéllemezei és a hajtás (szár + levélgyekek + virágkezdemény) friss- és szárazsúlymérésével jellemeztük.

A klorofilltartalom meghatározásánál a mintát abból a levélemeletből vettük, amelynél a különböző variánsok összehasonlításakor a klorózis tünetei a legkifejezettebbek voltak. Ez rendszerint a legfiatalabb kifejlett levél, ill. az utolsó, még fejlődésben levő levél volt. Ismert súlyú növényi anyagot 85%-os,  $\text{NH}_4\text{OH}$ -ra nézve 0,02 *N* acetonnal eldörzsöltük. A kapott homogenizátumot a szövetörmelék eltávolítására G 3-as üvegszűrőn szűrtük. Az így nyert oldat optikailag tiszta.

A klorofilltartalom meghatározása ARNON [2] módszerével történt:

$$\text{klorofill a} + \text{b (mg} \cdot \text{dm}^{-3}) = 20,2 E_{645} + 8,02 E_{663}.$$

### Vizsgálati eredmények

#### *Az uborka fejlődésének vaskoncentráció-függése*

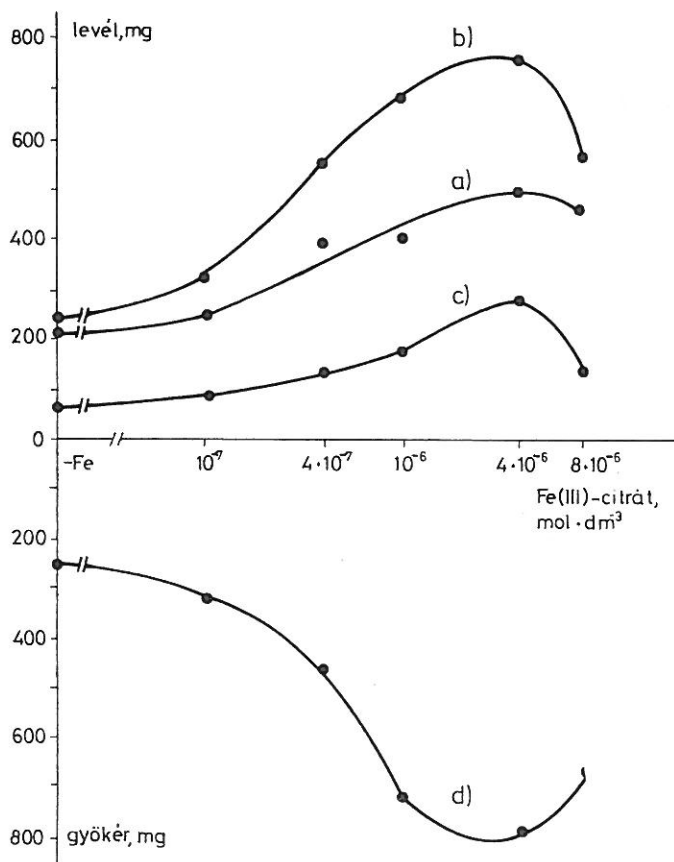
A növényeket az Anyag- és módszer részben leírtak szerint neveltük. A vasat vas(III)-citrát formájában adagoltuk, a koncentrációját  $10^{-7}$  és  $8 \cdot 10^{-6}$  mol  $\cdot$  dm<sup>-3</sup> között változtattuk és vashiányos variánst is beállítottunk. A tápoldat pH-értékének változását a vetéstől számított hetedik, kilencedik, tizenharmadik és tizenhatodik napon mértük. A növényeket 3 leveles állapotban

használtuk fel a növekedést és a klorofillszintézist jellemző értékek meghatározására.

Az 1. ábrán a három levélemelet és a gyökér friss súlyának változását tüntettük fel a vaskoncentráció függvényében. Világosan látszik, hogy az optimális érték  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , nagyobb vaskoncentráció kismértékben gátolja a növekedést. Egyértelmű, hogy  $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  koncentráció alatt a növény nem jut elegendő vashoz. Az uborka gyökere vashiányra jellegzetes elváltozást mutat: rövid marad, oldalgyökerei megvastagodnak.

Klorofilltartalomra a második levelet analizáltuk.  $4 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ -tól  $8 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ -ig a klorofill mennyisége  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ -re számolva közelítőleg azonos érték volt. Ezzel összhangban a 2. ábrán, ahol a második levél összes klorofilltartalmát tüntettük fel, a görbe lefutása hűen tükrözi a növekedési görbét.

A növény reakcióját a vashiányra rendkívül jellemzően mutatja az oldat pH-változása. A többi kísérleti adattal összhangban a  $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  külső vaskoncentrációnál leadott hidrogénion mennyisége jelzi legjobban a vas-



1. ábra

Az uborka növekedése a vaskoncentráció függvényében. a) első levél; b) második levél; c) harmadik levél; d) gyökér. Függőleges tengely: a levelek és a gyökér friss súlya, mg

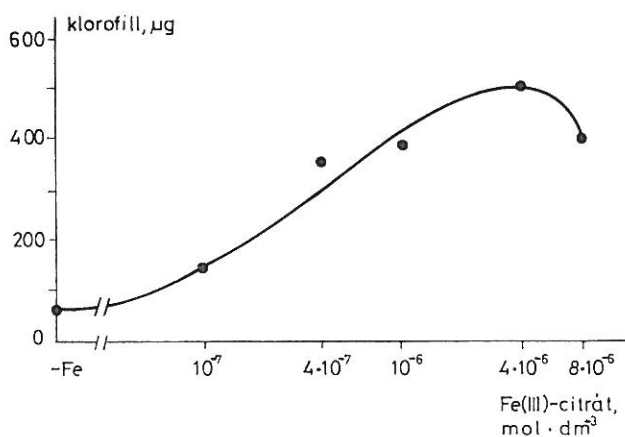
hiány és a jó vasellátottság közötti átmeneti állapotot. A fejlődés korai szakaszában (első lomblevél megjelenése) még a legkisebb vaskoncentráció is lényegesen csökkenti az oldat savanyodását a vashiányos kezeléshez képest (1. táblázat).

1. táblázat

## Az uborka tápoldatának hidrogénion-koncentrációja

(1) Vaskoncent- ráció, $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	(2) Hidrogénion-koncentráció, $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$				
	(3) Kiindulási érték	7. nap	9. nap	(4) 13. nap	16. nap
$\emptyset$	0,71	45,7	53,7	58,9	63,1
$10^{-7}$	0,80	18,2	20,9	46,8	52,5
$4 \cdot 10^{-7}$	0,83	11,2	11,8	42,7	34,7
$10^{-6}$	1,00	1,62	3,24	20,9	9,55
$4 \cdot 10^{-6}$	1,02	0,83	0,87	1,50	0,45
$8 \cdot 10^{-6}$	1,07	0,74	0,85	1,00	0,45

A növény növekedésével párhuzamosan a vashiányos állapotra jellemző pH-csökkentés eltolódik a nagyobb vaskoncentrációk felé.  $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  vas a fejlődés korai szakaszában még bizonyos mértékben ellátja vassal a növekvő növényt, amit az első lomblevél zöld színe is jelez. A növény levelei fokozatosan klorotikussá válnak, ahogyan a levél eléri a klorotikus növényre jellemző maximális levélnagyságot, kb. 2–3 cm átmérőt; a gyökér morfológiája teljes mértékben azonos marad a vasmentes oldatban nőtt növény gyökerével és a hidrogénion-leadás is ezt közelíti meg.  $4 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  koncentrációnál a fenti jelenség kissé gyengébben és késleltetve jelentkezik, a levelek színe már zöld, de a gyökér még a vashiány tüneteit mutatja. Mind morfológiailag, mind a hidrogénion-leadást tekintve a  $10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  vaskon-



2. ábra

Az uborka második levelének összes klorofilltartalma a vaskoncentráció függvényében

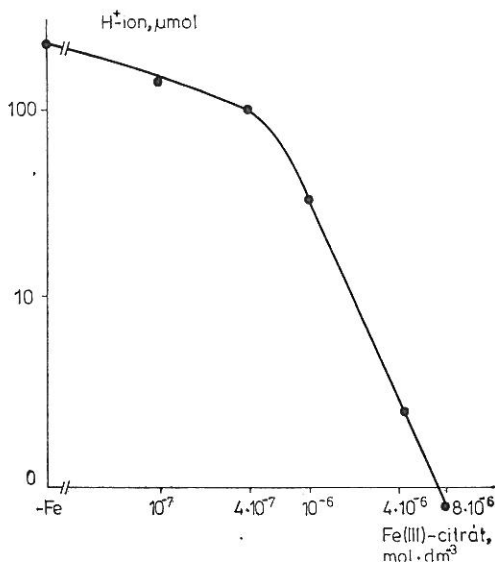
2. táblázat

## Mikroelemhiányok hatása az uborkára

(1) Tápoldat összetétele	(2)	(3)			(4)
	Gyökér	1. levél	2. levél	3. levél	Hajtás
	friss súly, mg/növény				
a) Teljes tápoldat (1/4 Hoagland + +összes mikroelem)	777,8	505,6	536,4	44,2	546,6
—Fe	210,7	208,5	169,2	0,0	297,7
—Zn	1000,0	475,8	587,6	40,6	526,4
—Cu	816,2	501,8	492,6	59,4	593,4
—Mn	767,0	386,5	536,0	61,5	542,0
—Mo	827,2	580,5	571,6	72,2	568,6
—B	742,4	497,4	568,2	63,4	531,6

centráció képezi az átmeneti állapotot. A gyökér csúcsi része a vashiányos növényre jellemző képet mutatja, bazális részén pedig normálisan növekednek az oldalgyökerek.

A 3. ábrán, ahol kétszer logaritmikus ábrázolásban tüntettük fel a nevelés egy szakaszában leadott hidrogénion mennyiségét a vaskoncentráció függvényében, szintén világosan látszik  $10^{-6}$  mol · dm<sup>-3</sup> koncentrációnál az átmeneti állapot. A tápanyagokkal normálisan ellátott növény a külső oldat pH-ját a semleges tartományban tartja.



3. ábra

Az uborkagyökér H<sup>+</sup>-ion-leadása a nevelés 7–16. napja között. Függőleges tengely: a tápoldatba leadott H<sup>+</sup>-ion, μmol

3. táblázat

## A hidrogénion-koncentráció változása különböző mikroelemhiányban

(1) Tápoldat összetétele	(2) Az oldat hidrogénion-koncentrációja, $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$			
	(3) Kiindulási érték	15. nap	(4) 18. nap	25. nap
a) Teljes tápoldat (1/4 Hoagland + + összes mikroelem)	1,82	2,69	0,22	0,12
—Fe	1,26	5,75	26,91	38,91
—Zn	1,74	3,02	0,52	0,32
—Cu	1,55	2,19	0,21	0,20
—Mn	1,45	1,82	0,21	0,13
—Mo	2,40	3,63	0,24	0,17
—B	1,62	1,32	0,14	0,12

Annak eldöntésére, hogy a vashiányban megfigyelt morfológiai elváltozások mennyire specifikusak valóban a vas hiányára, olyan kísérletet végeztünk, amelyben a különböző variánsok tápoldatából más-más mikroelemet hagytunk ki. A növekedésre jellemző friss súly értékeket a 2. táblázatban tüntettük fel.

Az adatok meggyőzően bizonyítják, hogy a 14 napos növényeknél még csupán a vas hiánya okoz számottevő növekedésgátlást. A különbség legélesebben éppen a gyökér friss súlyának adataiban mutatkozik.

A vashiány specifikus hatása igen élesen jelentkezik a tápoldat pH-jának változásában. Bármelyik mikroelemet hagyjuk ki a tápoldatból, a növények átmeneti gyenge savanyítás után 2–3 nap alatt az eredetihez képest enyhén lúgosítják az oldatot, ellentétben a vashiányos növényvel, amely a növekedéssel egyre erősebben savanyít (3. táblázat). Ez jelzi azt, hogy a hidrogénion-leadás, illetve az ezt kiváltó anyagcsere-folyamat nem egy általános mikroelemhiányra adott válaszreakció, hanem teljesen specifikus a vas hiányára.

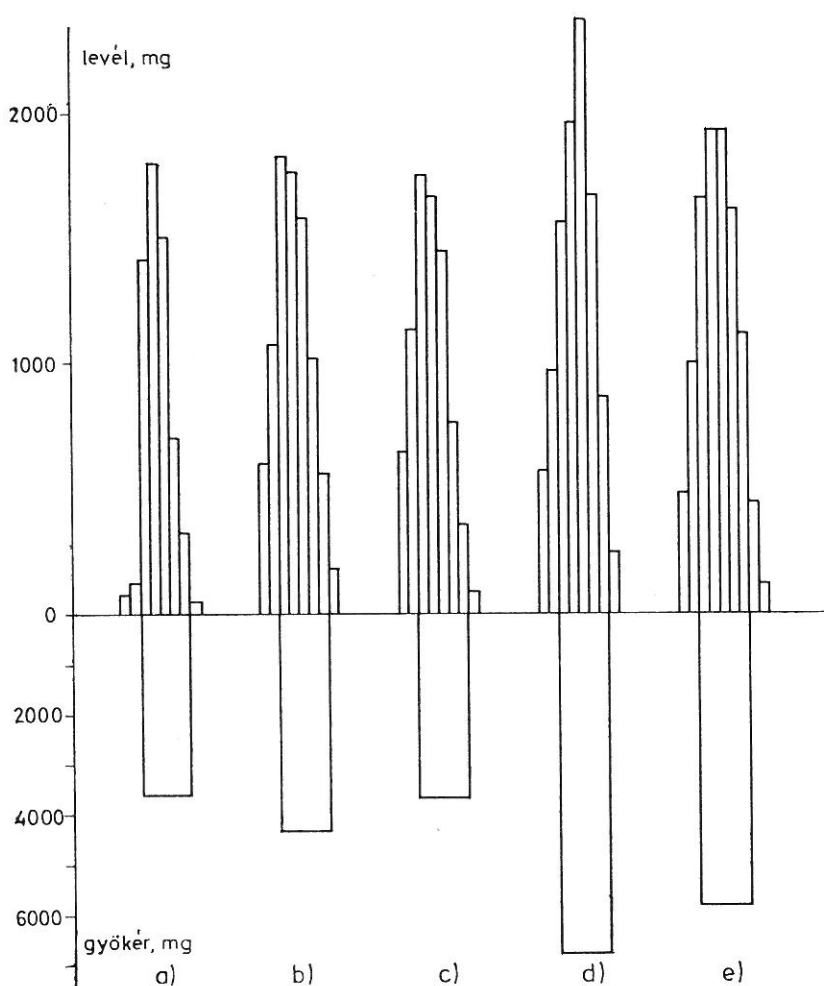
*Ioncserélt vízen nevelt, gyengén vashiányos növényekkel végzett vizsgálatok eredményei*

Négyleveles stádiumig 60 dm<sup>3</sup>-es kádakban, a tápoldat állandó levegőztetése mellett neveltük a növényeket. A 60 dm<sup>3</sup> tápoldat vasat nem tartalmazott, készítéséhez ioncserélt vizet használtunk. Egy-egy kádban 40 növény volt, nagyon erőteljesen fejlődtek, leveleik egyenletesen halványzöldek voltak, gyökereiken nem látszott vashiány. A növények fejlődésének intenzitásából nyilvánvaló volt, hogy vagy a környezetből (az ioncserélt vízből), vagy a saját tartalékból (sziklevél) vasat tudtak hasznosítani. Nem zárhatjuk ki egyik lehetőséget sem. o-Fenantrolinnal előhívott, vas(II)-re specifikus színreakcióval sem a koncentrált tápoldatban, sem a bepárolt ioncserélt vízben nem tudtunk vasat kimutatni, viszont a növényekről lecserélt tápoldat nyomokban tartalmazott vasat. A különböző kezelésekhöz 2 dm<sup>3</sup>-es polietilén edényekbe ültettük át egyenként a növényeket (az edényen levő fedő furatába).

A következő kezeléseket alkalmaztuk:

- a) vasmentes tápoldat desztillált vízzel készítve (dv)  
 b) vasmentes tápoldat ioncserélt vízzel készítve (ions.)  
 c) b) + FuN kelátor (FuN)  
 d) b) + FuN + 1,0 Fe<sup>III</sup> (FuN + 1,0 Fe<sup>III</sup>) } vaskoncentráció  
 e) b) + Fe<sup>III</sup>EDTA (Fe<sup>III</sup>EDTA) }  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$

A növényeket a virágzásig tudtuk nevelni.



4. ábra

Gyengén vashiányos növények további kezelésének eredményei. (Az oszlopok területe arányos a súllyal. Az egyes oszlopok az egymás után következő leveleket jelentik.) Független tengely: a levelek és a gyökér friss súlya, mg. a) desztillált vízzel készült tápoldat; b) ioncserélt vízzel készült tápoldat; c) FuN; d) FuN + 1,0 Fe<sup>III</sup>; e) Fe<sup>III</sup>EDTA



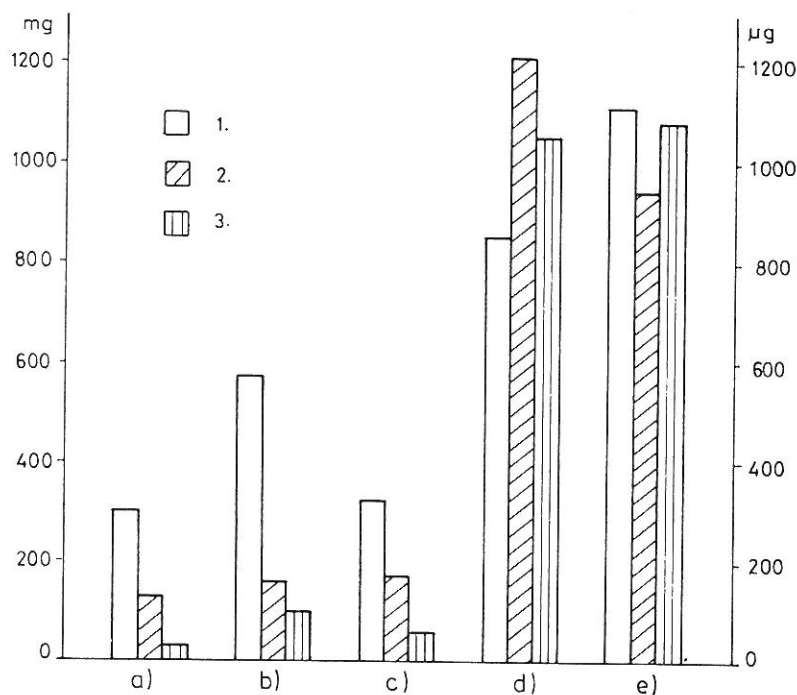
Az uborka növekedésére a vas és mesterséges fulvosav együttes adagolása volt a legkedvezőbb. A gyökér és levél friss súlya a  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ -sal kezelt variánsban volt a legnagyobb (4. ábra).

A klorofilltartalmat a még fejlődőben levő hatodik levélből határoztuk meg. Az 5. ábrán a hatodik levél friss súlyát és klorofillkoncentrációját, illetve összes klorofilltartalmát tüntettük fel.

A  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA kezelés a növény fejlődését meggyorsítja, a levelek hamarabb kezdenek kifejlődni; az értékeléskor csak ebben a variánsban jelent meg a nyolcadik levél. A hatodik levél friss súlya is nagyobb a  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA kezelésben, mint a vas + mesterséges fulvosav adagolásakor. A klorofill koncentrációja azonban a  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{\text{III}}$  variánsban a legnagyobb, így összes klorofilltartalma a levél kisebb súlya ellenére gyakorlatilag azonos a  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA-s levélével. A vashiányos különböző kezelésekből a klorofill koncentrációja gyakorlatilag azonos, a levelek összes klorofilltartalma így a levélsúllyal arányos (5. ábra).

#### *Erősen vashiányos növényekkel végzett vizsgálatok eredménye*

A  $2 \text{ dm}^3$ -es polietilén edényekben nevelt növényeket vasmentes tápoldaton tartottuk.



5. ábra

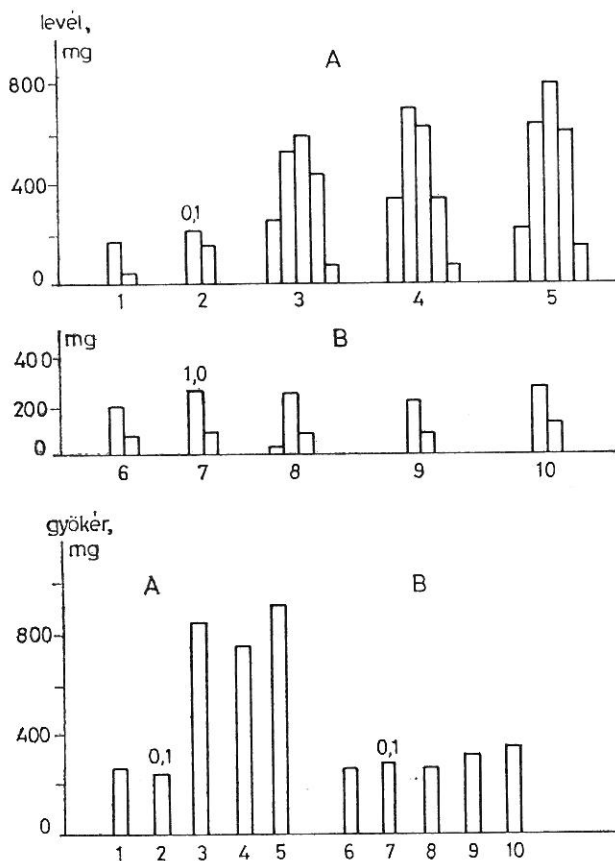
Gyengén vashiányos uborka hatodik levelének növekedése, klorofillkoncentrációja és klorofilltartalma. 1. Friss súly, mg; 2. Klorofillkoncentráció,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  friss súly; 3. Az egész levél klorofilltartalma,  $\mu\text{g}$ . a)–e): lásd 4. ábra

A növényeket harmadik levelük fejlődésekor kezdtük kezelni a vas-tartalmú oldatokkal, akkorra az első levelük már elpusztult. Gyökéren át  $10^{-5}$  mol  $\cdot$  dm $^{-3}$ , levélen át  $10^{-3}$  mol  $\cdot$  dm $^{-3}$  koncentrációjú vas-komplexekeket használtunk. A kísérletben 10 variánst állítottunk be.

*A kezelés módja*

gyökéren át	levélen át
1. -Fe	6. nonit (-Fe)
2. FuN (0,1 -Fe)	7. FuN (1,0 -Fe)
3. FuN + 0,1 Fe <sup>III</sup>	8. FuN + 0,1 Fe <sup>III</sup>
4. FuN + 1,0 Fe <sup>III</sup>	9. FuN + 1,0 Fe <sup>III</sup>
5. Fe <sup>III</sup> EDTA	10. Fe <sup>III</sup> EDTA

A tápoldatba vagy a levélre „vasmentes” oldatból annyi komplexképzőt vitünk (2., illetve 7. variáns), amennyit a 10 : 1 arányú, illetve 1 : 1 arányú

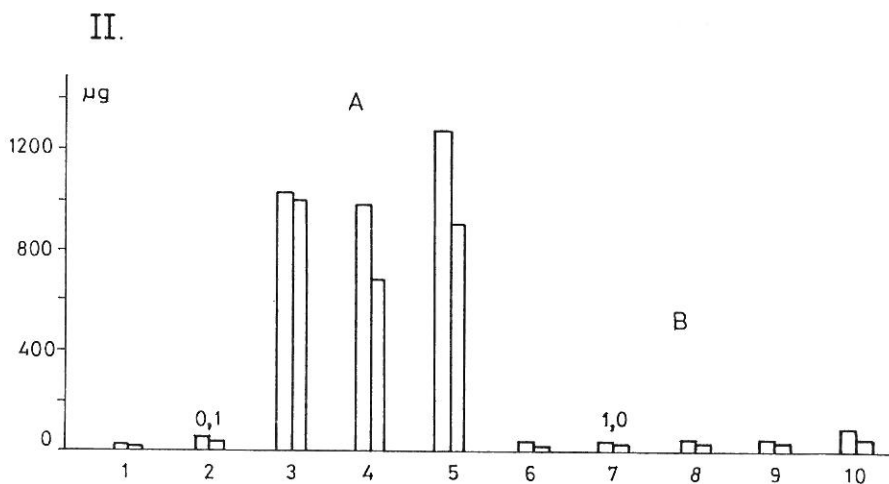
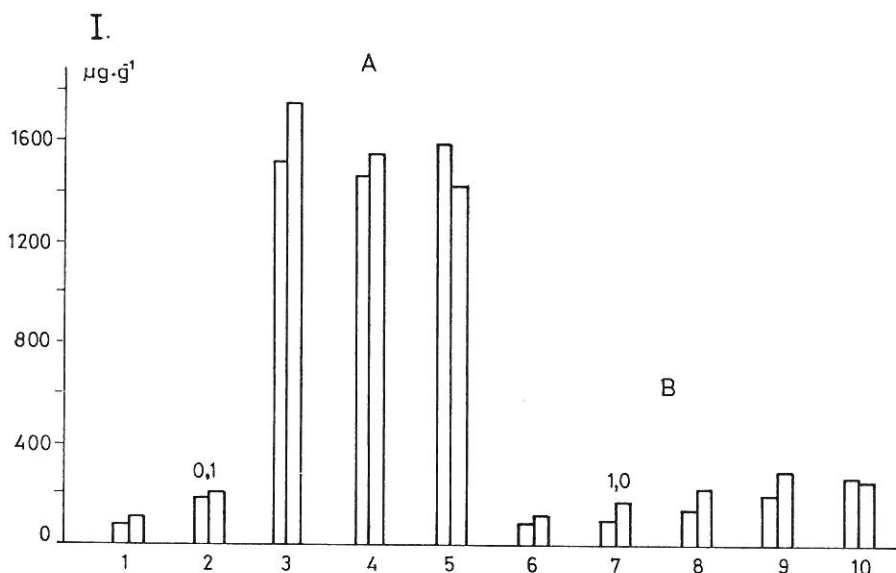


6. ábra

Erősen vashiányos állapotban kezelt uborkanövények növekedése. Az uborkalevelek és -gyökérzet friss súlya, mg. (Az egyes oszlopok az egymás után következő leveleket jelentik.) A) Vaskezelés gyökéren át: 1. -Fe; 2. FuN(-Fe); 3. FuN + 0,1 Fe<sup>III</sup>; 4. FuN + 1,0 Fe<sup>III</sup>; 5. Fe<sup>III</sup>EDTA. B) Vaskezelés levélen át: 6. nonit (felületaktív anyag); 7. FuN(-Fe); 8. FuN + 0,1 Fe<sup>III</sup>; 9. FuN + 1,0 Fe<sup>III</sup>; 10. Fe<sup>III</sup> EDTA

komplexxképző : vas oldatokból használtunk. A levélkezeléshez az oldatokat a mezőgazdaságban használt felületaktív anyaggal (nonit) kevertük. Kezeléskor a leveleket  $2 \times 30$  másodpercre bemártottuk az oldatokba. Nagyon gondosan ügyeltünk arra, hogy a levélre felvitt anyag ne kerülhessen a tápoldatba. A kezelést két héten át összesen négy alkalommal ismételtük meg.

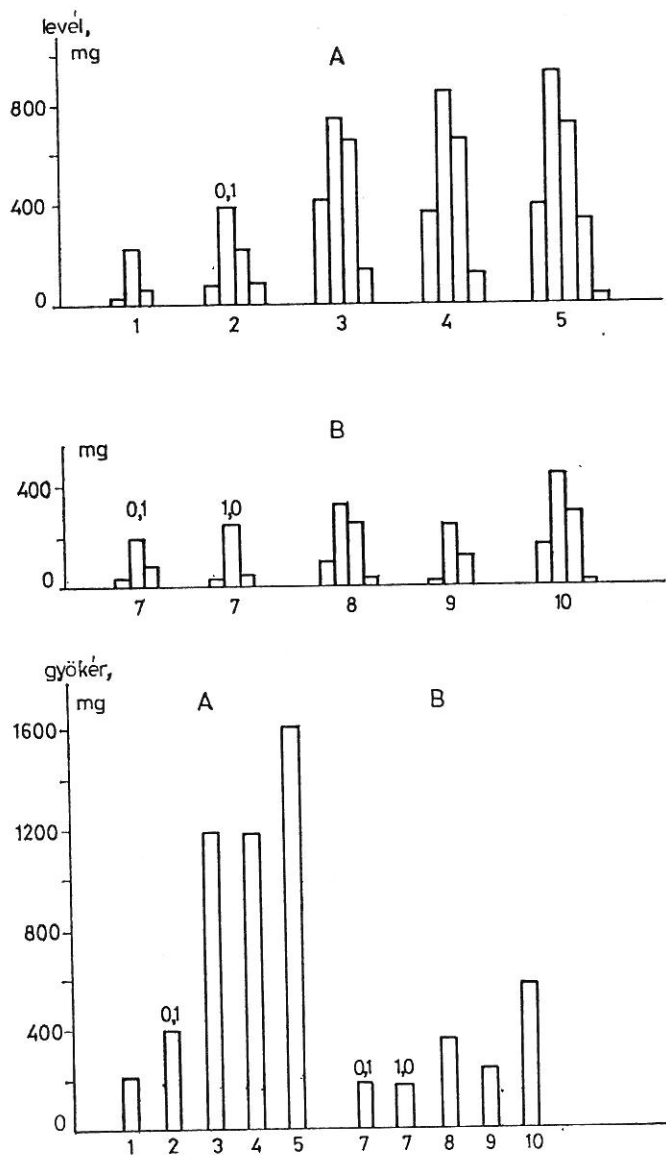
A növényeket az ültetés utáni 32. napon értékeltük, amikor az ép növényeken a hetedik levél már fejlődésnek indult. A vashiányos növényeknek az alsó leveleik elszáradtak, és csak a negyedik levelük növekedett.



7. ábra

Erősen vashiányos állapotban kezelt uborkanövények klorofilltartalma. Két egymás utáni uborkalevél klorofillkoncentrációja,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  friss súly (I) és a két levél összes klorofilltartalma,  $\mu\text{g}$  (II). A) és B) lásd 6. ábra

Gyökéren keresztül felvett vas hatására a növények tökéletesen regenerálódtak. A mesterséges fulvosavval (FuN) kezelt növények növekedése nem múlta felül a  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ -val kezeltét, de a fulvosav hatása a klorofillképződésre és a gyökér növekedésére teljesen egyenlő volt az ismert komplexképzőével, sőt a fiatalabb levelek zöldebbek, mint a  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ -val kezelték.

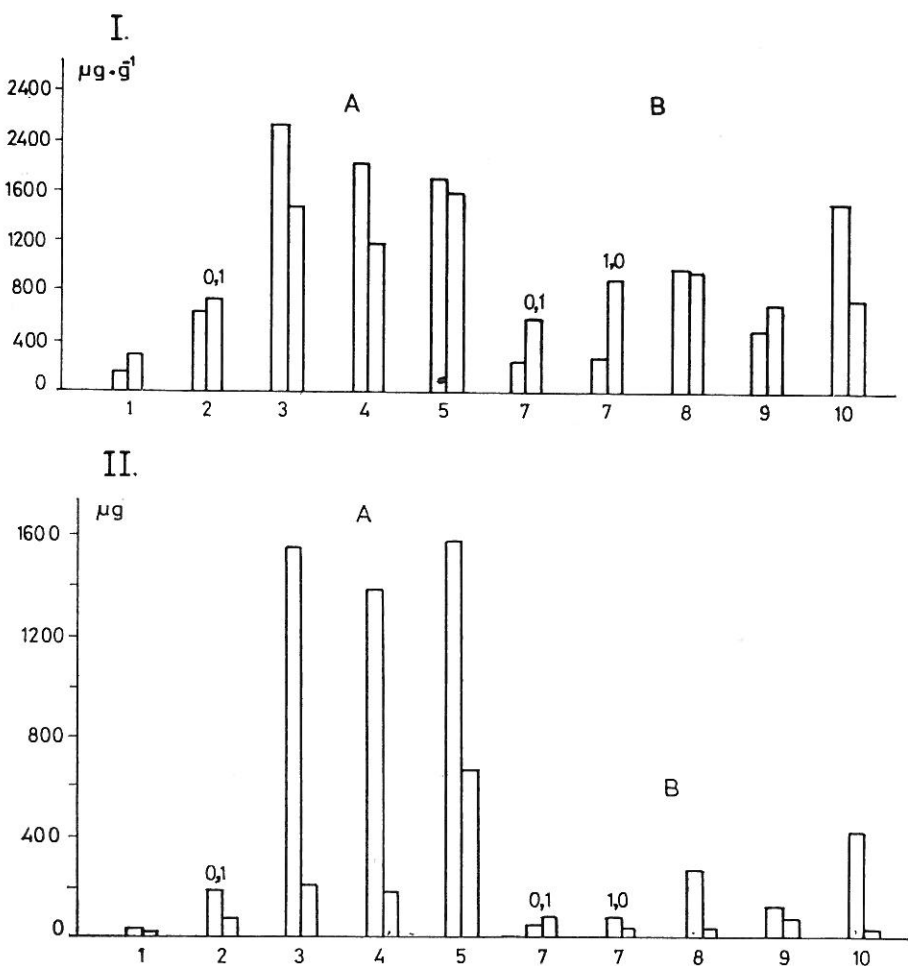


8. ábra

A vashiány kezdetén kezelt növények növekedése. Az uborkalevelek és -gyökérzet friss súlya, mg. A) és B) lásd 6. ábra

A levélen keresztül történt kezelés nagyon gyengén hatott: a levélszélek megzöldültek, a gyökéren alig mérhető, gyenge regenerálódás látszott, a növény nem indult növekedésnek. A 6. és 7. ábrán közölt adatok a fenti állításunkat egyértelműen igazolják. Figyelemre méltó, hogy milyen jelentős klorofillhiányt lehet az uborkanövénynél elérni.

Érdekes, hogy a tápoldatba adagolt komplexképző önmagában nem változtat a gyökér állapotán, a levelek alig zöldebbek, de a 4. levél jobban nő. A levél kezelésének hatástalansága azt mutatja, hogy a hiánytünet bizonyos mértéken túl ezzel a kezelési módszerrel nem szüntethető meg. A levélre jutott anyag az egész növény anyagcseréjét csak akkor befolyásolhatja, ha a felvett mennyiség elegendő ahhoz, hogy a gyökér mikrokörnyezetére is hatni



9. ábra

A vashiány kezdetén kezelt növények klorofilltartalma. Két egymás utáni uborkalevél klorofillkoncentrációja,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  friss súly (I) és a két levél összes klorofilltartalma,  $\mu\text{g}$  (II). A) és B) lásd 6. ábra

tudjon. Lehetséges azonban az is, hogy a tápanyaghiány olyan mértéket ér el, hogy a növény a reduktív kapacitás kialakításának képességét is elveszíti. Ennek a kérdésnek a megválaszolásához a kísérleti anyag még nem elegendő, sőt a kérdés anyagcsere-élettani háttere sem teljesen világos.

Az igen nagy mértékben vashiányos növényeket nézetünk szerint valójában a folyamatos hidrogénion-kiválasztás teszi életképtelenné, és ez a folyamat a levélpermetezés hatására nem változik.

#### *A vashiány kialakulásának kezdeti állapotában végzett kezelés hatása*

A polietilén edényekben, vasmentes tápoldaton nevelt növények kezelését akkor kezdtük meg, amikor az első levélen a vashiány tünete, a klorofilltartalom csökkenése jelentkezni kezdett, és a gyökér is már a vashiányos állapotot mutatta. A kezelések módja megegyezik az erősen vashiányos növényeknél leírtakkal. A kezelések hatását az ültetés utáni 23. napon értékeltük.

A növények a gyökéren keresztül adagolt vas hatására tökéletesen regenerálódtak. A klorofilltartalom a harmadik levélnél a  $\text{FuN} + 0,1 \text{ Fe}^{\text{III}}$  kezeléskor volt a legnagyobb. A  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{\text{III}}$  kezelés a  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA-val azonos hatást eredményezett (8. és 9. ábra).

A vasat a növények a leveleiken keresztül is felvették, a zöldülés kifejezett (egyenletes) volt, ha nem is olyan mértékű, mint a gyökéren át kezelt növényeknél. A komplexképző felesleg hatása kifejezetten előnyös volt. Érdekes, hogy a növények a vas nélküli kontrollhoz képest jelentősen növekedtek is. Levélen keresztül adagolt  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA-nak és a  $\text{FuN} + 0,1 \text{ Fe}^{\text{III}}$  kezelésnek, és a gyökéren át a  $\text{FuN} (0,1\text{-Fe})$  kezelésnek közelítőleg azonos hatása volt a növekedésre. A pozitív hatású levélkezelés, bár kismértékben, de mérhetően hatott a gyökér regenerálódására is.

#### **Vizsgálati eredmények értékelése, következtetések**

A bevezetőben felvetett kérdések megválaszolására az uborka jó teszt-növény, mert a vashiányra igen érzékeny és jellemző reakciókkal válaszol. Ezek közül legfeltűnőbb, hogy az egész korai fejlődési szakaszban levő növény gyökere még az első lomblevél megjelenése előtt a vashiányos oldatban jelentős mennyiségű hidrogéniont ad le. A hidrogénion-leadás érzékeny a külső vaskoncentrációra (1. táblázat és 3. ábra). Az uborka gyökere vashiányra jellegzetes elváltozást mutat: rövid marad, oldalgyökerei megvastagodnak. A gyökér a felvehető vas adagolására azonnal reagál, a gyökércsúcsok növekedésnek indulnak. Vashiányos tápoldaton teljesen klorózisos uborkanövény nevelhető, ahol a lomblevélben nemcsak a klorofill mennyisége csökken, hanem a klorofillformák aránya is megváltozik [BÖDDI B. szóbeli közlés, Bp. 1981.].

A gyökér és hajtás friss súlyának, a fejlődésben levő levél klorofilltartalmának és a gyökér hidrogénion-leadásának eredményeit összevetve, az uborka neveléséhez  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  külső vaskoncentráció bizonyult optimálisnak. Azonban a növekedés és a klorofillszintézis (-tartalom) nem azonosan reagál a vas növekvő koncentrációjára, az uborkánál a levél klorofillkoncentrációja ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )  $4 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  külső vaskoncentrációnál már telítési értéket ér el. Más növényfajoknál a növekedés és a klorofilltartalom

alakulása más görbe szerint függ a vaskoncentrációtól ([10], valamint saját, még nem publikált eredmények).

A növény reagálása a tápanyag-ellátottságra mind elméleti, mind gyakorlati szempontból felveti azt a lényeges kérdést, hogy egy-egy hatás értékelésénél, pl. éppen a hiánytünetek megszüntetésekor, melyek azok a mutatók, melyeket vizsgálnunk kell, hogy helyesen tudjuk értékelni a beavatkozásunk következményeit. Különösen a növekedést serkentő hatások értékelése igényel nagy körültekintést. A vas az optimális koncentrációhoz képest kis feleslegben ( $8 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) gátolta a levelek és a gyökér növekedését, de a friss súlyra számolt klorofilltartalom ennél a koncentrációnál volt a legnagyobb. Csak a termésmennyiség értékelése adhatna arra választ, hogy a szüretelt uborka, az uborkamag, ill. annak csírázási erélye vagy betegség-ellenállása szempontjából a két vaskoncentráció-érték közül (optimális, ill. gyengén gátló), melyiket kell választanunk. Növényélettani tesztek nélkül természetesen még a határértékeket sem lehet megállapítani.

A különböző mértékben vashiányossá nevelt növények a tápoldatra adagolt és a levélre juttatott vaskomplexekre egészen különböző módon reagálnak. Az ioncserélt vízzel készített tápoldat nem volt alkalmas erősen vashiányos növények előállítására. A növények valamilyen formában vashoz jutottak. Mivel vasnyomokat csak a növényekről lecsérélt tápoldatban tudtunk kimutatni, feltételezhető, hogy a vas a sziklevelekből reutilizálódott. Ennek azonban ellene szól, hogy az üvegdesztillálóból származó vízzel készített tápoldaton történő továbbnevelés kifejezetten gátolta a növekedést (4. ábra) és a klorofillképződést is (5. ábra) az ioncserélt vízzel készített vashiányos tápoldaton tartott növényekhez képest.

Az MTA KKKI-ben előállított mesterséges fulvosavak önmagukban, tehát vas bevitel nélkül is serkentik a növekedést és a klorofill mennyisége is nő (6., 7., 8. és 9. ábrák). A pozitív hatásnak több oka is lehet. Az a legkézenfekvőbb, hogy a kelátor előállítására használt kiindulási növényi anyagból származó vas a serkentés oka. Viszont ennek az elképzelésnek ellene szólnak a *Spirodela polyrrhiza*-val kapott, még nem publikált eredményeink, amelyek szerint már egészen kis kelátormennyiségnek is mérhető a növekedést serkentő hatása, és ez a hatás a kelátormennyiség növelésével gyorsan eléri a maximumát. A klorofilltartalom viszont a kelátorkoncentrációval egyenes arányban nő.

Nagymértékben vashiányos uborkanövények gyökéren keresztül a  $\text{FuN} + \text{Fe}^{\text{III}}$  komplexből felvették a vasat és tökéletesen regenerálódtak. A  $\text{FuN} + \text{Fe}^{\text{III}}$  nem múlta felül a  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$  hatását, de hatása a klorofillképződésre és a gyökér növekedésére egyenlő volt az ismert komplexével, sőt a fiatalabb levelek zöldőbbek, mint a  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ -val kezelt növényeké.

A nagymértékben vashiányos növények levélen keresztül alig képesek felvenni a vasat és nem regenerálódnak. A vashiány kialakulásának korai szakaszában kezelt uborkanövények viszont a leveleiken keresztül is felvették a vasat, a zöldülés kifejezett és egyenletes volt, ha nem is olyan mértékű, mint a gyökéren át kezelt növényeké. A gyökéren keresztül adagolt vassal tökéletesen regenerálódtak.

Kimutattuk a komplexképző felesleg kifejezetten előnyös hatását is. A pozitív hatású levélkezelés, bár kismértékben, de mérhetően hatott a gyökér regenerálódására is.

## Összefoglalás

A növények vaskelvétele, -hasznosítása jobban nyomon követhető a külső vaskoncentráció és a növény megfelelő élettani folyamatai közötti összefüggések feltárásával, mint a növény összes vastartalmának meghatározásával. Az előbbi vizsgálati módszer ugyanis a növényben valóban hasznosuló, az anyagcsere-folyamatokban aktív szerepet játszó vas hatását veszi figyelembe.

Kísérleteinkben a növekedést (súlygyarapodást), klorofillszintézist (-tartalmat) és a gyökér hidrogénion-leadását mértük a tápoldat vaskoncentrációjának függvényében. Vizsgáltuk komplexképzők (EDTA illetve mesterséges fulvosavak — FuN) hatását a vas hasznosulására. A kísérletekhez vízkultúrában nevelt uborkát (*Cucumis sativus* L. cv. Budai korai) használtunk.

Megállapítottuk, hogy a növények optimális fejlődéséhez  $4 \cdot 10^{-6}$  mol  $\cdot$  dm $^{-3}$  külső vaskoncentráció szükséges. Ennél kisebb vaskoncentrációnál hiánytünetek lépnek fel, amelyek adott kísérleti körülményeink között specifikusak a vas hiányára és kellően érzékenyek is a vashiány kimutatására.

Vashiányosan nevelt növények a hiány kezdeti szakaszában gyökérén át és levélen át is képesek vasat felvenni és hasznosítani, bár a gyökér kezelése jóval hatásosabb. A vashiány súlyossá válásakor a levélkezelés már teljesen hatástalan, a gyökérkezelés azonban még ekkor is képes a növényt regenerálni.

A fulvosavak kísérleti, laboratóriumi úton előállított mesterséges származékai (FuN) komplexképzőként a növény vasellátásának biztosítására az EDTA-val azonos vagy jobb hatásúak. A komplexképző a vas mennyiségéhez képest feleslegben adva még kedvezőbb hatású a vashiányos növény regenerálására.

## Irodalom

- [1] AKTAŞ, M. & EGMOND, F. VAN: Effect of nitrate nutrition on iron utilization by an Fe-efficient and an Fe-inefficient soybean cultivar. *Plant and Soil*. **51**. 257—274. 1979.
- [2] ARNON, D. I.: Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* **24**. 1—15. 1949.
- [3] AZARABADI, S.: Bedeutung der Rhizosphäre für die Eisenernährung von Maispflanzen. Dissertation Techn. Universität Berlin. 1977.
- [4] BROWN, J. C.: Fe and Ca uptake as related to root-sap and stem-exudate citrate in soybeans. *Physiol. Plant.* **19**. 968—976. 1966.
- [5] BROWN, J. C. & AMBLER, J. E.: „Reductants” released by roots of Fe-deficient soybeans. *Agron. J.* **65**. 311—314. 1973.
- [6] BROWN, J. C. & CHANEY, R. L.: Effect of iron on the transport of citrate into the xylem of soybeans and tomatoes. *Plant Physiol.* **47**. 836—840. 1971.
- [7] BROWN, J. C. & JONES, W. E.: pH changes associated with iron-stress response. *Physiol. Plant.* **30**. 148—152. 1974.
- [8] BROWN, J. C. & OLSEN, R. A.: Factors related to iron uptake by dicotyledonous and monocotyledonous plants. III. Competition between root and external factors for Fe. *J. Plant Nutr.* **2**. 661—682. 1980.
- [9] BROWN, J. C. & TIFFIN, L. O.: Iron stress as related to the iron and citrate occurring in stem exudate. *Plant Physiol.* **40**. 395—400. 1965.
- [10] CHRIST, R. A.: Iron requirement and iron uptake from various iron compounds by different plant species. *Plant Physiol.* **54**. 582—585. 1974.
- [11] DEJAEGERE, R. et al.: Relationships between proton extrusion and iron uptake in barley seedlings. In: *Mineral Nutrition of Plants*. (Ed.: KUDREV, T., STOYANOV, I. & GEORGIEVA, V.) Vol. I. Sofia 1979. pp. 25—38.
- [12] DEKOCK, P. C.: Iron nutrition under conditions of stress. *J. Plant Nutr.* **3**. 513—521. 1981.



- [13] EGMOND, F. VAN & AKTAŞ, M.: Iron-nutritional aspects of the ionic balance of plants. *Plant and Soil*. **48**. 685–703. 1977.
- [14] FUSHIYA, S., SATO, Y. & NOZOE, S.: Avenic acid A, a new amino acid possessing an iron chelating activity. *Tetrahedron Letters*. **21**. 3071–3072. 1980.
- [15] KASHIRAD, A. & MARSCHNER, H.: Iron nutrition of sunflower and corn plants in mono and mixed culture. *Plant and Soil*. **41**. 91–101. 1974.
- [16] KASHIRAD, A. & MARSCHNER, H.: Effect of pH and phosphate on iron nutrition of sunflower and corn plants. *Agrochimica*. (Pisa) **18**. 497–508. 1974.
- [17] KOJIMA, N. & BATES, G. W.: A kinetic method for determining iron reducing activity released from plant roots. *J. Plant Nutr.* **3**. 615–623. 1981.
- [18] LAKATOS, B. et al.: Eljárás ligno-cellulóz alapú anyagok fémkelátjainak előállítására az alapanyag teljes feltárásával. 369/81. alapszámú szabadalmi bejelentés. 1981.
- [19] MAGGIONI, A.: Iron absorption by excised grapevine roots. *Vitis*. **19**. 105–112. 1980.
- [20] MARSCHNER, H. & BARBER, D. A.: Iron uptake by sunflower plants under sterile and non-sterile conditions. *Plant and Soil*. **43**. 515–518. 1975.
- [21] MARSCHNER, H., RÖMHELD, V. & AZARABADI, S.: Iron stress response of efficient and inefficient plant species. *Proceedings of the 8th International Colloquium on Plant Analysis and Fertilizer Problems*. Auckland. New Zealand. pp. 319–327. 1978.
- [22] NOMOTO, K. et al.: X-ray crystal structure of the copper (II) complex of mugineic acid, a naturally occurring metal chelator of graminaceous plants. *J. C. S. Chem. Comm.* 338–339. 1981.
- [23] NOMOTO, K. et al.: Structure of 2'-deoxymugineic acid, a novel amino acid possessing an iron-chelating activity. *Chimia*. **35**. 249–250. 1981.
- [24] OLSEN, R. A. & BROWN, J. C.: Factors related to iron uptake by dicotyledonous and monocotyledonous plants. I. pH and reductant. *J. Plant Nutr.* **2**. 629–645. 1980.
- [25] OLSEN, R. A. & BROWN, J. C.: Factors related to iron uptake by dicotyledonous and monocotyledonous plants. II. The reduction of  $Fe^{3+}$  as influenced by roots and inhibitors. *J. Plant Nutr.* **2**. 647–660. 1980.
- [26] OLSEN, R. A. et al.: Chemical aspects of the Fe stress response mechanism in tomatoes. *J. Plant Nutr.* **3**. 905–921. 1981.
- [27] POLLARD, P. C. & FINCHER, G. B.: Biosynthesis of arabinogalactan-protein in *Lolium multiflorum* (ryegrass) endosperm cells. I. Hydroxylation of peptidyl proline. *Aust. J. Plant. Physiol.* **8**. 121–132. 1981.
- [28] RÖMHELD, V.: Mechanismus der Aufnahme und Verlagerung von Eisenchelaten bei höheren Pflanzen. Dissertation Techn. Universität Berlin. 1979.
- [29] RÖMHELD, V. & MARSCHNER, H.: Effect of Fe stress on utilization of Fe chelates by efficient and inefficient plant species. *J. Plant Nutr.* **3**. 551–560. 1981.
- [30] SCHERER, H. W. & HÖFNER, W.: Ein Beitrag zum Eisen/Phosphat Antagonismus. *Z. PflErnähr. Bodenkd.* **143**. 645–651. 1980.
- [31] SMITH, M. A.: Characterization of carrot cell wall protein. I. Effect of  $\alpha, \alpha'$ -dipyridyl on cell wall protein synthesis and secretion in incubated carrot discs. *Plant Physiol.* **68**. 956–963. 1981.
- [32] TAKAGI, S.: Naturally occurring iron-chelating compounds in oat- and rice-root washings. *Soil Sci. Plant. Nutr.* **22**. 423–433. 1976.
- [33] TAKEMOTO, T. et al.: Structure of mugineic acid, a new amino acid possessing an iron-chelating activity from roots washings of water-cultured *Hordeum vulgare* L. *Proc. Japan Acad.* **54**. Ser. B. 469–473. 1978.
- [34] TIFFIN, L. O.: Translocation of iron citrate and phosphorus in xylem exudate of soybean. *Plant Physiol.* **45**. 280–283. 1970.
- [35] VENKAT-RAJU, K., MARSCHNER, H. & RÖMHELD, V.: Effect of iron nutritional status on ion uptake, substrate pH and production and release of organic acids and riboflavin by sunflower plants. *Z. PflErnähr. Bodenkd.* **132**. 177–190. 1972.

Érkezett: 1982. május 7.

## Study on the Effectiveness of Fe Uptake

E. CSEH, K. BUJTÁS, I. BUZÁS, I. SZEKENI, J. MEISEL, G. MÁDY  
and B. LAKATOS

Dept. of Plant Physiology, Eötvös Loránd University, Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences and Central Research Institute for Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest

### Summary

An increased interest has been shown recently concerning the uptake mechanism of  $\text{Fe}^{2+}$  because iron-chlorosis is one of the economically most harmful deficiency symptoms in agriculture.

Uptake and utilization of Fe in plants can be better followed by studying the relationships between environmental Fe concentration and physiological plant processes responding to Fe concentration than by measuring the total quantity of Fe in different parts of plants. The first method takes into account only the physiologically active form of Fe.

In our experiments growth (fresh weight), chlorophyll synthesis (total content) and  $\text{H}^+$ -efflux of root system as functions of the Fe concentration in the medium were measured. Effects of chelating agents (EDTA and synthetic fulvic acids — FuN, respectively) on the utilization of Fe were also investigated. The experiments were conducted with cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv. Budai korai) growing in solution culture under standardized conditions.

For the optimum development of plants  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  Fe in the nutrient solution was necessary. When the Fe concentration is below this value, deficiency symptoms appear which are specific and sensitive enough for indicating Fe deficiency in our experimental conditions. In Fe deficient cucumber plants (given nitrate-N nutrition) shoot and root growth and chlorophyll synthesis are inhibited and the root system acidifies the nutrient solution to a great extent.

At the beginning of Fe deficiency the plants can absorb and utilize in their metabolism Fe from suitable chelates through their root system and their leaves, respectively, but the treatment through the root system is more effective. As the deficiency symptoms grow stronger, treatment through the leaves becomes ineffective but Fe given into the nutrient solution can regenerate the plants.

Synthetic derivatives of fulvic acids (FuN), prepared experimentally in the laboratory, used as chelating agents are equal to or better than EDTA in supplying the plants with Fe. Chelator given in excess to Fe ( $\text{FuN} + 0.1 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ) is better than in equimolar ratio to Fe ( $\text{FuN} + 1.0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ) for regenerating the Fe deficient plants.

Table 1.  $\text{H}^+$  concentration of the nutrient solution of cucumber. (1) Fe concentration,  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . (2)  $\text{H}^+$  concentration: (3) Original value and (4) on the 7th, 9th, 13th and 16th days,  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

Table 2. Effects of various micro-element deficiencies on the cucumber plant. (1) Composition of the nutrient solution. a) whole nutrient solution (1/4 Hoagland + micro-elements). (2) Root, (3) 1st leaf, 2nd leaf, 3rd leaf, (4) Shoot, fresh weight, mg/plant.

Table 3. Alteration of  $\text{H}^+$  concentration by different micro-element deficiencies. For (1) and a) see Table 2. (2)  $\text{H}^+$  concentration of the nutrient solution,  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . (3) Original value. (4) On the 15th, 18th and 25th days.

Fig. 1. The growth of cucumber plants as affected by the Fe concentration. a) first leaf; b) second leaf; c) third leaf; d) root. Vertical axis: fresh weight of leaves and roots, mg. Horizontal axis:  $\text{Fe}^{\text{III}}$ -citrate,  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

Fig. 2. Total chlorophyll content of the 2nd leaf of a cucumber plant as affected by the Fe concentration. Vertical axis: chlorophyll,  $\mu\text{g}$ .

Fig. 3.  $\text{H}^+$ -efflux of cucumber roots from the 7th to the 16th day of growth. Vertical axis: amount of  $\text{H}^+$  ( $\mu\text{mol}$ ) effluxed into the nutrient solution.

Fig. 4. Results of further treatments applied to slightly Fe-deficient plants. (The area of the columns is proportional to the fresh weight. The upper columns of each group represent consecutive leaves.) Vertical axis: fresh weight of leaves and roots, mg. a) nutrient solution with distilled water; b) nutrient solution with deionized water; c) FuN; d)  $\text{FuN} + 1.0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ; e)  $\text{Fe}^{\text{III}}$ EDTA.

*Fig. 5.* Growth, chlorophyll concentration and chlorophyll content of the 6th leaf of a slightly Fe-deficient cucumber plant. 1. Fresh weight, mg; 2. Chlorophyll concentration,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  fresh weight; 3. Chlorophyll content of the whole leaf,  $\mu\text{g}$ . For a)–c) see Fig. 4.

*Fig. 6.* Growth of cucumber plants treated with Fe in a strongly Fe-deficient state. The fresh weight of leaves and roots, mg. (The columns of the two upper groups represent consecutive leaves.) A) Fe treatment through the roots: 1. -Fe; 2.  $\text{FuN}$  (-Fe); 3.  $\text{FuN} + 0.1 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ; 4.  $\text{FuN} + 1.0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ; 5.  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ . B) Fe treatment through the leaves: 6. Nonit (surfactant) -Fe; 7.  $\text{FuN}$  (-Fe); 8.  $\text{FuN} + 0.1 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ; 9.  $\text{FuN} + 1.0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ ; 10.  $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ .

*Fig. 7.* Chlorophyll content of cucumber plants treated with Fe in a strongly Fe-deficient state. (I) Chlorophyll concentration of two consecutive leaves,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  fresh weight and (II) total chlorophyll content of the leaves,  $\mu\text{g}$ . For A) and B) see Fig. 6.

*Fig. 8.* Growth of cucumber plants treated with Fe at the early stage of Fe-deficiency. The fresh weight of leaves and roots, mg. For A) and B) see Fig. 6.

*Fig. 9.* Chlorophyll content of cucumber plants treated with Fe at the early stage of Fe-deficiency. (I) Chlorophyll concentration of two consecutive leaves,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  fresh weight and (II) total chlorophyll content of the leaves,  $\mu\text{g}$ . For A) and B) see Fig. 6.

## Untersuchung der Wirksamkeit von Eisen(II)-Ionen

E. CSEH, K. BUJTÁS, I. BUZÁS, I. SZEBENI, J. MEISEL, GY. MÁDY  
und B. LAKATOS

Lehrstuhl für Pflanzenphysiologie der Universität „Eötvös Loránd“,  
Forschungsinstitut für Bodenkunde und Agrarkulturchemie der Ungarischen Akademie der Wissenschaften  
und Zentrales Forschungsinstitut für Chemie der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest

### Zusammenfassung

In den letzten Jahren zeigt sich ein gesteigertes Interesse für die Erforschung des Mechanismus der Aufnahme von Eisen(II)-Ionen, da die infolge Eisenmangels auftretende Chlorose eine den bedeutendsten Schaden verursachende Mangelerscheinung in der Landwirtschaft ist. Die Aufnahme und Verwertung von Eisen in der Pflanze kann durch Erschliessung der Zusammenhänge zwischen äusserer Eisenkonzentration und den entsprechenden pflanzenphysiologischen Vorgängen besser verfolgt werden als durch Feststellung des gesamten Fe-Gehaltes in der Pflanze. Die erstgenannte Untersuchungsmethode nimmt nämlich nur die in den Stoffwechselvorgängen eine aktive Rolle spielende Eisenwirkung, die in den Pflanzen tatsächlich verwerteten Eisenmengen in Betracht.

In unseren Versuchen wurde das Wachstum (die Mengenzunahme), die Chlorophyllsynthese (der Chlorophyllgehalt) und die Abgabe der Wurzel an Wasserstoffionen in der Funktion der Eisenkonzentration der Nährlösung gemessen. Es wurde die Wirkung von Komplexbildenden Verbindungen (EDTA, bzw. künstliche Fulvosäuren —  $\text{FuN}$ ) auf die Eisenverwertung untersucht. Als Testpflanze dienten in Wasserkulturen gezogene Gurkenpflanzen (*Cucumis sativus* L. cv. Budai korai).

Es konnte festgestellt werden, dass zur optimalen Entwicklung der Pflanzen eine äussere Konzentration von  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  benötigt wird. Bei geringeren Konzentrationen als die angeführte treten Mangelerscheinungen auf, welche unter den gegebenen Versuchsbedingungen für den Eisenmangel spezifisch und gleichzeitig ausreichend empfindlich sind um den Eisenmangel nachweisen zu können. Bei den an Eisenmangel leidenden Gurkenpflanzen ist das Wachsen der Wurzeln und Sprosse, sowie die Synthese des Chlorophylls behindert und ihr Wurzelsystem versäuert die Nährlösung in einem grossen Ausmass (mit  $\text{NO}_3 - \text{N}$  genährte Pflanzen).

Die unter den Verhältnissen von Eisenmangel gezogenen Pflanzen können beim Auftreten des Mangels (im Anfangsstadium) Eisen aus entsprechenden Komplexverbindungen durch ihre Wurzeln, wie auch durch ihre Blätter aufnehmen und verwerten.

Die Behandlung der Wurzeln ist aber das erfolgreichere Verfahren. Wenn der Eisenmangel schon fortgeschritten ist, ist die Behandlung der Blätter vollkommen wirkungslos, eine Behandlung der Wurzeln kann aber auch in diesem Zustand die Pflanze regenerieren.

Zur Sicherung der Eisenversorgung der Pflanzen erwiesen sich die im Laboratorium hergestellten Fulvosäurederivate (FuN) als gerade so gute oder noch wirksamere komplexbildende Verbindungen als die EDTA. Ihre günstigere Auswirkung auf die Regeneration der an Eisenmangel leidenden Pflanze tritt dann zum Vorschein, wenn FuN nicht in äquimolarer Menge mit dem Eisen ( $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{III}$ ), sondern im Überschuss ( $\text{FuN} + 0,1 \text{ Fe}^{III}$ ) angewendet wird.

*Tab. 1.* Wasserstoffionenkonzentration der Nährlösung. (1) Eisenkonzentration,  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . (2) Wasserstoffionenkonzentration,  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . (3) Ausgangswert. (4) Vom 7–16. Tag.

*Tab. 2.* Wirkung des Mikronährstoffmangels auf die Gurkenpflanzen (Angaben bezogen auf die Frischmasse, mg/Pflanze). (1) Zusammensetzung der Nährlösung: a) komplette Nährlösung (1/4 Hoagland + sämtliche Mikroelemente). (2) Wurzeln. (3) 1–3. Blatt. (4) Sprosse.

*Tab. 3.* Änderung in der Wasserstoffionenkonzentration infolge Mangels unterschiedlicher Mikroelemente. (1) Zusammensetzung der Nährlösung: a) komplette Nährlösung (1/4 Hoagland + sämtliche Mikroelemente). (2) Wasserstoffionenkonzentration der Nährlösung,  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . (3) Ausgangswert. (4) Vom 15–25. Tag.

*Abb. 1.* Wachstum der Gurkenpflanze in der Funktion der Fe-Konzentration. a) Erstes Blatt; b) Zweites Blatt; c) Drittes Blatt; d) Wurzeln. Ordinate: Frischmasse, mg. Abszisse:  $\text{Fe}^{III}$ -Citrat,  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

*Abb. 2.* Gesamter Chlorophyll-Gehalt des zweiten Gurkenblattes in der Funktion der Fe-Konzentration. Ordinate: Chlorophyll,  $\mu\text{g}$ .

*Abb. 3.* Abgabe von  $\text{H}^+$ -Ionen durch die Gurkenwurzel zwischen dem 7. und 16. Tag. Ordinate: In die Nährlösung gelangende  $\text{H}^+$ -Ionen,  $\mu\text{mol}$ .

*Abb. 4.* Ergebnisse weiterer Behandlungen bei an Fe schwach mangelnden Pflanzen. (Die Säulen sind mit der Menge proportional. Die einzelnen Säulen bedeuten die nacheinander folgenden Blätter.) Ordinate: Frischmenge der Blätter und Wurzeln, mg. a) Mit destilliertem Wasser hergestellte Nährlösung; b) Mit desionisiertem Wasser hergestellte Nährlösung; c) FuN; d)  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{III}$ ; e)  $\text{Fe}^{III}\text{EDTA}$ .

*Abb. 5.* Wachstum, Chlorophyll-Konzentration und Chlorophyllgehalt des sechsten Gurkenblattes bei schwachem Fe-Mangel. 1. Frischmenge, mg; 2. Chlorophyllkonzentration,  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  Frischmenge; 3. Chlorophyllgehalt des ganzen Blattes,  $\mu\text{g}$ . a) – e): s. Abb. 4.

*Abb. 6.* Wachstum nach Behandlung von an einem schweren Fe-Mangel leidenden Gurkenpflanzen. Frischmenge der Gurkenblätter und der Wurzeln. (Die Säulen der zwei oberen Gruppen representieren benachbarte Blätter.) A) Behandlung mit Fe durch die Wurzeln. B) Behandlung mit Fe durch die Blätter.

*Abb. 7.* Chlorophyllgehalt nach Behandlung von an einem schweren Fe-Mangel leidenden Gurkenpflanzen. Chlorophyllkonzentration (I) und Chlorophyllgehalt (II) zwei benachbarter Gurkenblätter. A) und B): s. Abb. 6.

*Abb. 8.* Wachstum von Gurkenpflanzen behandelt bei Auftreten des Fe-Mangels. Frischmenge der Gurkenblätter und der Wurzeln. A) und B): s. Abb. 6.

*Abb. 9.* Chlorophyllgehalt von Gurkenpflanzen behandelt bei Auftreten des Fe-Mangels. Chlorophyllkonzentration (I) und Chlorophyllgehalt (II) zwei benachbarter Gurkenblätter. A) und B): s. Abb. 6.

## Изучение эффективности усвоения железа

Э. ЧЕХ, К. БУЙТАШ, И. БУЗАШ, И. СЕБЕНИ, Й. МЕЙЗЕЛ, Д. МАДИ  
и Б. ЛАКАТОШ

Государственный Университет им. Этвеша, Кафедра физиологии растений,  
Научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии ВАН и Центральный  
научно-исследовательский институт химии ВАН, Будапешт

## Резюме

В последние годы возрос интерес в направлении изучения механизма усвоения ионов железа(II), поскольку в сельском хозяйстве хлороз, вызванный недостатком железа, наносит значительный ущерб урожаю. Можно лучше проследить усвоение растениями железа, вскрывая зависимость между внешней концентрацией железа и соответствующими физиологическими процессами, чем определяя только общее содержание железа в растении. Первый метод исследования принимает во внимание только влияние железа, играющего активную роль в процессах обмена веществ и действительно усваивающегося в растении.

В опытах изменили рост (увеличение веса), синтез (содержание) хлорофилла и отдачу корнем водородных ионов в зависимости от концентрации ионов железа в питательном растворе. Изучили влияние комплексообразователей (ЕДТА или искусственные фульвокислоты  $FuN$ ) на усвоение железа. Для опытов использовали огурцы *Cucumis sativus* L. cv. (Budai korai), выращенные в водной культуре.

Установили, что для оптимального развития растений требуется внешняя концентрация железа  $4 \cdot 10^{-6}$  моль  $дм^{-3}$ . При более низкой концентрации проявляются симптомы голодания, которые в данных условиях опыта специфичны на недостаток железа и весьма чувствительны на показ его недостатка. Недостаток железа тормозит образование отростков и рост корней, синтез хлорофилла. Корневая система значительно подкислила питательный раствор (растения получившие нитратный азот).

Растения воспитанные в водной среде с недостатком железа в ранней стадии голодания способны через корни и листья брать железо из соответствующих комплексов, но обработка корней гораздо эффективнее. При остром голодании обработка листьев уже не дает никакого эффекта, а обработка корней и в это время может регенерировать растения.

Искусственные производные фульвокислот, созданные лабораторным путем ( $FuN$ ), как комплексообразователи обеспечивают растения железом в такой же мере как и ЕДТА, или еще лучше. Комплексообразователь, вносимый в количестве превышающем содержание железа, ( $FuN + 0,1 Fe^{III}$ ) более эффективно регенерирует растения, чем в количестве эквивалентном с железом ( $FuN + 1, 0 Fe^{III}$ ).

Табл. 1. Концентрация водородных ионов в питательной среде, в которой выращивались огурцы. (1) Концентрация железа, моль  $дм^{-3}$ . (2) Концентрация водородных ионов  $\mu$ моль  $дм^{-3}$ . (3) Исходная величина. (4) Между 7 и 16 днем.

Табл. 2. Влияние недостатка железа на огуречное растение. Данные по свежему весу, мг/растение. (1) Состав питательного раствора: а) Полный раствор (1/4 Гоагланд + все микроэлементы). (2) Корень. (3) 1—3. лист. (4) Побег.

Табл. 3. Изменение концентрации водородных ионов при недостатке различных микроэлементов. (1) Состав питательного раствора. а) Полный раствор (1/4 Гоагланд + все микроэлементы). (2) Концентрация водородных ионов в растворе,  $\mu$ моль  $дм^{-3}$  (3) Исходная величина. (4) Между 15 и 25 днем.

Рис. 1. Рост огуречного растения в зависимости от концентрации железа, а) Первый лист. б) Второй лист. в) Третий лист. д) Корень. По вертикальной оси: Свежий вес, мг. По горизонтальной оси:  $Fe^{III}$ -цитрат, моль  $дм^{-3}$ .

Рис. 2. Общее содержание хлорофилла во втором листе огуречного растения в зависимости от концентрации железа. По вертикальной оси: Хлорофилл,  $\mu$ г.

Рис. 3. Отдача ионов водорода корнем огуречного растения между 7 и 16 днем. По вертикальной оси: Водородные ионы перешедшие в питательный раствор,  $\mu$ моль.

Рис. 4. Результаты дальнейшей обработки растений, выращенных в среде со слабым недостатком железа. (Площадь столбцов, соответствует весу. Отдельные столбцы означают появление один за другим листьев.) По вертикальной оси: Свежий вес листьев и корня, мг. а) Питательная среда приготовленная с дистиллированной водой. б) Питательный раствор приготовленный с ионообменной водой. в)  $FuN$ . д)  $FuN + 1,0 Fe^{III}$ . е)  $Fe^{III}$ ЕДТА.

*Рис. 5.* Рост шестого листа, концентрация хлорофилла и содержание хлорофилла при выращивании растения в питательном растворе со слабым недостатком железа. 1. Свежий вес, мг. 2. Концентрация хлорофилла  $\mu\text{г. г.}^{-1}$  свежего веса. 3. Содержание хлорофилла во всем листе,  $\mu\text{г.}$  от а) до е) смотри на рисунке 4.

*Рис. 6.* Рост огуречного растения в питательном растворе в стадии высокого недостатка железа. Свежий вес листьев и корней огурца, мг. (Отдельные столбцы означают последовательное появление листьев.) А) Пополнение железом через корень: 1. — Fe. 2.  $\text{FuN}/-\text{Fe}$ . 3.  $\text{FuN} + 0,1 \text{ Fe}^{\text{III}}$ . 4.  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ . 5.  $\text{Fe}^{\text{III}}$  ЕДТА. В) Пополнение железом через листья: 6. Нонит (поверхностно-активное вещество) — Fe. 7.  $\text{FuN}/-\text{Fe}$ . 8.  $\text{FuN} + 0,1 \text{ Fe}^{\text{III}}$ . 9.  $\text{FuN} + 1,0 \text{ Fe}^{\text{III}}$ . 10.  $\text{Fe}^{\text{III}}$  ЕДТА.

*Рис. 7.* Содержание хлорофилла в огуречном растении, обработанном в стадии высокого недостатка железа. Концентрация хлорофилла в двух следующих друг за другом листьях огурцов,  $\mu\text{г. г.}^{-1}$  свежего веса (I) и общее содержание хлорофилла,  $\mu\text{г}$  (II). А) и В) смотри на рисунке 6.

*Рис. 8.* Рост растений, обработанных в начальной стадии нехватки железа. Свежий вес листьев и корней, мг. А) и В) смотри на рисунке 6.

*Рис. 9.* Содержание хлорофилла в растениях, обработанных в начальной стадии нехватки железа. Концентрация хлорофилла в двух следующих друг за другом листьях огурцов,  $\mu\text{г. г.}^{-1}$  свежего веса (I) и общее содержание хлорофилла,  $\mu\text{г}$  (II). А) и В) смотри на рисунке 6.